

# PERANCANGAN SISTEM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 PHASA DENGAN *DIRECT TORQUE CONTROL* (DTC) MENGGUNAKAN *SLIDING MODE CONTROL* (SMC) BERBASIS *ALGORITMA GENETIKA*

M. Nur Faizi  
Institut Teknologi Sepuluh  
Nopember  
emnoer\_faizi@yahoo.com

Mochammad Rameli  
Institut Teknologi Sepuluh  
Nopember  
rameli@ee.its.ac.id

Eka Iskandar  
Institut Teknologi Sepuluh  
Nopember  
iskandar@elect-eng.its.ac.id

Secara umum dalam dunia industri, motor induksi lebih banyak digunakan daripada motor arus searah. Dikarenakan sifat motor induksi yang kokoh, handal, mudah dalam perawatan, dan harga relatif murah. Tetapi pengontrolan pada motor induksi lebih kompleks dibandingkan dengan motor arus searah, hal ini disebabkan oleh kompleksitas dinamika motor induksi, sehingga algoritma pengaturannya lebih kompleks. Berdasarkan masalah tersebut penulis melakukan penelitian pada motor induksi menggunakan metode *Sliding Mode Control* (SMC) berbasis *Algoritma Genetika*, di mana *Algoritma Genetika* dirancang untuk masalah optimalisasi parameter *Sliding Mode Control* (SMC) yaitu (*gain K*) yang optimal, guna untuk mengatasi kekurangan pada *Direct Torque Control* (DTC) konvensional yang masih menimbulkan fluktuasi *ripple* fluks dan fluktuasi *ripple* torsi yang tinggi pada saat kondisi *steady state*, sehingga dari tujuan metode yang diusulkan, hasil dari sistem yang dirancang dapat mengatur kecepatan putar motor induksi sesuai referensi yang diberikan sebesar 1000 rpm dengan *settling time* yaitu 0.6282 detik, dan juga dapat meminimalkan fluktuasi *ripple* fluks dan fluktuasi *ripple* torsi.

Kata kunci: *Direct Torque Control*, *Sliding Mode Control*, Motor Induksi, *Algoritma Genetika*, *gain K*.

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Secara umum, dalam dunia industri motor arus bolak-balik lebih banyak digunakan daripada motor arus searah. Dikarenakan sifatnya yang kokoh, handal, mudah dalam perawatan, dan harga relatif murah [1], sedangkan motor arus searah banyak digunakan sebagai alternatif pada mesin-mesin yang memerlukan pengaturan kecepatan tertentu karena memiliki karakteristik dinamis yang linier dibanding motor arus bolak-balik. Namun motor arus searah juga memiliki beberapa kelemahan yaitu dari segi ekonomis karena biaya pemeliharaannya lebih mahal dibanding motor arus bolak-balik, sedangkan pengontrolan pada motor arus bolak-balik jauh lebih kompleks dibandingkan dengan motor arus searah karena disebabkan oleh kompleksitas dinamika motor induksi, sehingga algoritma pengaturannya lebih kompleks [2].



Usaha-usaha memperbaiki keterbatasan motor arus bolak-balik tersebut untuk keperluan pengontrolan terdiri dari dua metode yaitu pengaturan skalar dan vektor. Pengaturan skalar beroperasi pada keadaan *steady state* dan juga dibutuhkan pengaturan kecepatan sudut dari arus, tegangan, dan *linkage* fluks dalam *space vector*. Dengan penjelasan demikian bahwa pengaturan skalar tidak dapat beroperasi dalam keadaan *transient state*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dapat menggunakan pengaturan vektor, di mana metode tersebut bisa bekerja dalam keadaan *transient state* dan tidak hanya dapat mengatur sudut kecepatan dan magnitudo, tapi juga arus, tegangan, dan fluks. Salah satu metode pengaturan yang populer untuk pengaturan vektor adalah *Field Oriented Control* (FOC) yang diperkenalkan oleh F.Blaschke (Direct FOC) dan Hasse (Indirect FOC) di awal tahun 1970, di mana FOC dapat memberikan performa dan efisiensi tinggi untuk berbagai aplikasi industri [3].

FOC bagus untuk menghasilkan performa dinamik tinggi, *ripple* torsi dan fluks yang rendah, tapi FOC memiliki kekurangan, seperti memerlukan pengaturan arus, membutuhkan 2 koordinat transformasi dan sensitifitas parameter mesin yang tinggi. Kekurangan ini dapat dieliminasi menggunakan *Direct*

*Torque Control* (DTC) yang diusulkan oleh Isao Takahashi dan Toshihiko Noguchi, pada tahun 1980. Dibandingkan dengan FOC, DTC lebih sederhana dalam hal struktur, kebutuhan komputasi yang sedikit, efisiensi dan performa yang tinggi [3].

*Direct Torque Control* (DTC) merupakan salah satu skema pengaturan berdasarkan pengaturan fluks stator dan torsi yang memberikan respon cepat dan kokoh yang diimplementasikan pada motor arus bolak-balik. DTC ini memiliki kelebihan antara lain lebih sederhana dan mempunyai performa dinamik yang baik serta tidak sensitif terhadap perubahan parameter, khususnya tahanan stator. Akan tetapi penggunaan DTC konvensional memiliki beberapa kekurangan yaitu dapat menimbulkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi yang tinggi saat kondisi *steady state* [3].

Dalam hal untuk mengatasi masalah ini, diusulkan DTC dengan *Sliding Mode Control* (SMC) di mana *Sliding Mode Control* (SMC) adalah salah satu teknik pengontrolan yang memiliki sifat kokoh terhadap gangguan maupun perubahan parameter [5]. Skema kontrolnya adalah dengan memaksa *vector error* dan *delta error* (*trajektori*) menuju ke arah permukaan lurus. Namun kekurangan dari penggunaan kontroler *Sliding Mode Control* (SMC) adalah adanya fenomena



*chattering*. Munculnya fenomena *chattering* ini, dikarenakan proses pemeliharaan *trajektori* pada permukaan luncur tersebut. Fenomena *chattering* ini dapat mengganggu stabilitas dari sistem kontrol yang kurang baik untuk respon sistem terutama pada fluktuasi *ripple* fluks dan torsi sehingga keberadaannya perlu direduksi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari penjelasan latar belakang di atas, bahwa permasalahan sistem pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa bergantung kepada respon fluktuasi *ripple* fluks dan torsi yang dibangkitkan, semakin besar fluktuasi *ripple* yang dibangkitkan, dapat mempengaruhi stabilitas putaran rotor motor induksi 3 fasa. Dengan digunakan kontroler *Sliding Mode Control* (SMC), sistem memiliki kemampuan yang kokoh terhadap gangguan dan perubahan parameter, namun permasalahan *Sliding Mode Control* (SMC) adalah penentuan parameter (*gain K*) yang dilakukan dengan cara coba-coba (dilakukan dengan cara memilih nilai yang sesuai atau nilai yang memenuhi kriteria). Oleh karena itu, pada tesis ini akan dirancang sistem pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dengan *Sliding Mode Control* berbasis *Algoritma Genetika*, dimana *Algoritma Genetika* dirancang untuk mendeteksi nilai *ripple*

torsi, sehingga hasil dari optimasi *Algoritma Genetika* adalah nilai yang terbaik atau yang optimal dan digunakan untuk *men-Tuning (gain K)* pada SMC untuk mendapatkan nilai *ripple* yang kecil.

## 1.3 Batasan Masalah

Penulis membatasi permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini nantinya. Berdasarkan hasil membaca literatur, maka penulis membatasi permasalahan tersebut sebagai berikut:

1. *Plant* yang dikendalikan merupakan motor induksi 3 fasa dalam bentuk model d-q.
2. Efek dari rugi-rugi besi dan tembaga diabaikan.
3. Ruang lingkup yang dibahas yaitu permasalahan respon kecepatan pada saat kondisi *transient*, kemampuan sistem dalam mereduksi fluktuasi *ripple* fluks dan torsi.
4. Optimalisasi parameter *Sliding Mode Control* (SMC) dilakukan secara *off-line*, menggunakan metode *Algoritma Genetika*.
5. Parameter *plant* tetap.

## 1.4 Tujuan

Sistem pengaturan yang dirancang diharapkan mampu menghasilkan kecepatan putaran motor yang diinginkan sesuai dengan referensi yang diberikan dan *Algoritma Genetika* bisa menghasilkan



(*gain K*) yang optimal untuk parameter *Sliding Mode Control* (SMC). Dengan demikian diharapkan dapat memberikan hasil yang baik dalam usaha mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa dalam hal meminimalkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi terutama pada saat *steady state*.

### 1.5 Kontribusi

Dapat memberikan sumbangan pemikiran dan referensi akan sebuah metode kontrol yang mana dalam penelitian ini digunakan *Sliding Mode Control* (SMC) berbasis *Algoritma Genetika* yang diharapkan mampu men-*Tuning* parameter SMC yaitu *gain K* dan dapat meminimalkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi, sehingga pengontrolan kecepatan putar motor induksi 3 fasa dapat bekerja dengan baik.

### 1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

#### 1. Studi Literatur

Tahap ini diperlukan sebagai langkah awal sebelum mengerjakan penelitian. Hal-hal yang dipelajari antara lain mempelajari cara kerja *plant*, cara menggunakan *plant*, dan cara mengontrol *plant* melalui buku, jurnal, media *online*, dan lain-lain.

#### 2. Pemodelan Sistem

Pada tahap ini akan dilakukan pemodelan fisik sistem pengaturan motor induksi 3 fasa.

#### 3. Perancangan Sistem

Berdasarkan hasil pemodelan sistem. Estimasi kecepatan motor akan dibandingkan dengan kecepatan referensi untuk menghasilkan error. *Error* dan *delta error* kecepatan rotor sebagai masukan pada *Sliding Mode Control* (SMC), *Algoritma genetika* digunakan untuk masalah optimalisasi parameter *Sliding Mode Control* (SMC). Perancangan sistem ini akan dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB.

#### 4. Pengujian Dan Analisa

Pada tahap pengujian dan analisis, sistem yang dibangun khusus pada kondisi berbeban, respon kecepatan diharapkan stabil dan dapat memenuhi dengan nilai referensi yang diberikan, dan respon fluktuasi *ripple* fluks dan torsi dapat minimum.

#### 5. Kesimpulan

Kesimpulan diperoleh sesuai dengan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan.

#### 6. Penulisan Laporan Tesis

Penulisan buku Tesis dimulai dari penelitian sampai tahap akhir. Buku Tesis ditulis secara intensif bila



proses analisis dan pengujian telah selesai.

## 2. KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

### 2.1 Kajian Pustaka

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian yang berhubungan dengan sistem pengaturan motor induksi 3 fasa. Dalam penelitian ini, diperlukan teori-teori atau metode-metode yang berhubungan dengan apa yang diteliti. Teori atau metode yang berhubungan di antaranya adalah tentang pengaturan fluktuasi torsi.

Penelitian yang dilakukan T. Ramesh, dan A Kumar dalam penelitiannya menyebutkan, metode konvensional *Direct Torque Control* (DTC) mempunyai skema pengaturan yang sederhana, membutuhkan perhitungan yang sedikit, performa yang tinggi, dan efisien, tetapi akan penggunaan DTC ini menimbulkan fluktuasi *ripple* fluks dan torsi yang tinggi [3]. Sedangkan Chien-Feng Hu, Rong-Bin Hong, dan Chang-Huan Liu dalam penelitian pengaturan kecepatan dengan tuning kontroler PI, di mana tuning kontroler PI dapat mengatur kecepatan putaran motor induksi mencapai referensi kecepatan yang diinginkan, tetapi membutuhkan *continues tuning* nilai yang pasti dari gain proporsional ( $K_p$ ) dan integral ( $K_i$ ) untuk memperoleh performa kontroler yang bagus [4].

Dalam penelitian mengenai pengaturan kecepatan putaran motor induksi, Tanvir Ahammad, Abdul R. Beig, Khalifa Al-Hosani didalam penelitiannya [5], meningkatkan *Direct Torque Control* dari Motor Induksi dengan pendekatan modifikasi *Sliding Mode Control* (SMC) dapat membuktikan bahwa pengaturan motor induksi dengan metode *Sliding Mode Control* (SMC) kecepatan motor memiliki respon yang unggul, dan ketahanan yang baik dalam menghadapi ketidakpastian termasuk gangguan beban. Selain itu, akurasi *performance* dapat dicapai, serta fluktuasi *ripple* fluks dan torsi berkurang jika dibandingkan dengan teknik DTC konvensional. Namun pada penelitian ini permasalahan *chattering* belum bisa diatasi dengan sepenuhnya dimana fenomena *chattering* ini timbul akibat proses pemeliharaan trayektori pada salah satu sinyal kontrol dari metode *Sliding Mode Control* (SMC).

Maka untuk mengatasi permasalahan tersebut, pada penelitian ini dilakukan pengaturan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa dengan *Direct Torque Control* (DTC) Menggunakan *Sliding Mode Control* (SMC) Berbasis *Algoritma Genetika*. Dimana *Algoritma Genetika* mampu mengatasi permasalahan optimasi kombinasi, yaitu mendapatkan suatu nilai solusi optimal terhadap suatu permasalahan



yang mempunyai kemungkinan banyak solusi [13].

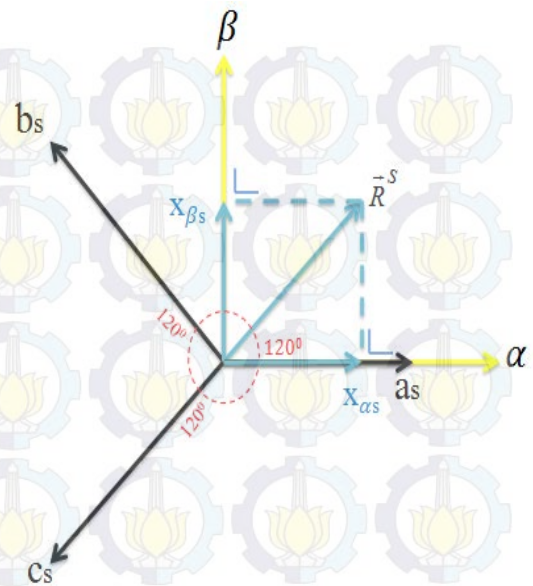
### 2.2.1 Model Matematika Motor Induksi [11]

Performansi dinamik dari mesin AC agak kompleks karena kumparan rotor 3 fasa bergerak pada lilitan stator 3 fasa. Pada dasarnya kumparan stator dan rotor pada motor induksi dapat dianggap sebagai trafo dengan bagian keduanya bergerak, di mana koefisien kopling antara fasa stator dan rotor berubah secara kontinyu dengan perubahan dari posisi rotor  $\theta_r$ . Model dari motor induksi dapat digambarkan dengan persamaan diferensial serta mutual induktansi yang berubah terhadap waktu, tapi model yang lainnya cenderung sangat kompleks.

Dalam bentuk sistem koordinat, perubahan sistem koordinat stasioner tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem koordinat dua fasa yang berputar (d,q) dipisahkan menjadi dua langkah yaitu Transformasi Clarke dan Transformasi Park:

#### a. Transformasi Clarke

Transformasi Clarke atau transformasi ( $\alpha\beta$ ) merupakan transformasi tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem dua fasa ( $\alpha,\beta$ ) yang stasioner. Gambar 1. merupakan Gambar transformasi clarke.



Gambar 1. Transformasi Clarke

Untuk mengubah sistem koordinat stasioner tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem koordinat dua fasa ( $\alpha\beta$ ), persamaan dalam bentuk matriks dapat ditulis dengan persamaan:

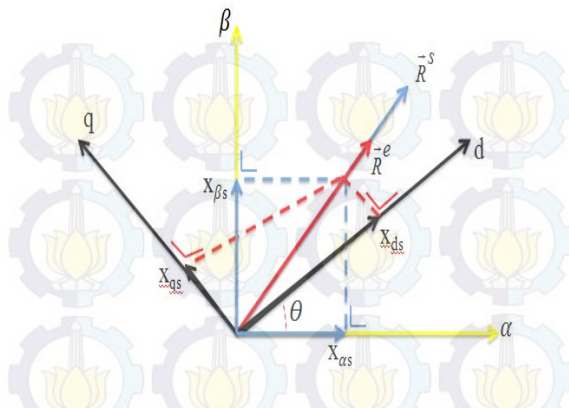
$$\begin{bmatrix} X_{\alpha s} \\ X_{\beta s} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{as} \\ X_{bs} \\ X_{cs} \end{bmatrix}$$

Dengan  $k$ , Transformasi Clarke:

$$k = \frac{2}{3}$$

#### b. Transformasi Park

Transformasi Park merupakan transformasi sistem dua fasa stasioner ( $\alpha,\beta$ ), menjadi sistem dua fasa yang berputar, *direct* dan *quadrature* (dq). Gambar 2. merupakan Gambar transformasi park.



**Gambar 2** Transformasi Park

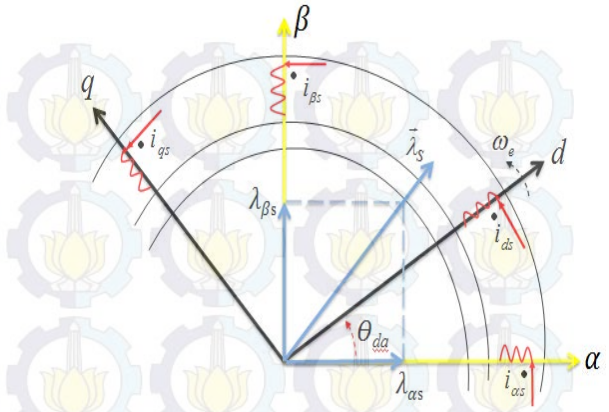
Dari sistem koordianat yang mengubah sistem koordinat stasioner tiga fasa (a,b,c), menjadi sistem koordinat dua fasa yang berputar (dq), maka didapat persamaan fluks stator dan rotor:

$$\begin{aligned}\lambda_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \lambda_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \lambda_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\ \lambda_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds}\end{aligned}\quad (2.4)$$

Kemudian untuk mencari persamaan tegangan d-q, kumparan stator dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned}V_{as} &= R_s \cdot i_{as} + \frac{d}{dt} \lambda_{as} \\ V_{bs} &= R_s \cdot i_{bs} + \frac{d}{dt} \lambda_{bs}\end{aligned}\quad (2.5)$$

Rangkaian kumparan ekivalen stator  $\alpha\beta$  dan d-q dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3** Rangkaian Ekivalen stator  $\alpha\beta$  dan d-q

Dari Gambar 3. dapat dilihat untuk mencari tegangan stator d-q yaitu dengan cara mengkombinasikan kedua persamaan di atas dapat ditulis:

$$\vec{V}_{s\_a\beta}^{\alpha} = R_s \vec{i}_{s\_a\beta}^{\alpha} + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_{s\_a\beta}^{\alpha} \quad (2.15)$$

di mana:

$$\vec{V}_{s\_a\beta}^{\alpha} = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$$

Dengan operator  $(j)$ , maka:

$$\begin{aligned}\vec{V}_{s\_a\beta}^{\alpha} &= \vec{V}_{s\_dq} \cdot e^{j\theta} da \\ \vec{i}_{s\_a\beta}^{\alpha} &= \vec{i}_{s\_dq} \cdot e^{j\theta} da \\ \vec{\lambda}_{s\_a\beta}^{\alpha} &= \vec{\lambda}_{s\_dq} \cdot e^{j\theta} da\end{aligned}\quad (2.16)$$

di mana:

$$\vec{V}_{s\_dq} = V_{ds} + jV_{qs}$$

maka:



$$\vec{V}_{s,dq}^{\alpha} \cdot e^{j\theta a} =$$

$$R_s \cdot \vec{i}_{s,dq} \cdot e^{j\theta} + \frac{d}{dt} (\vec{\lambda}_{s,dq} \cdot e^{j\theta da})$$

Atau

$$\vec{V}_{s,dq}^{\alpha} \cdot e^{j\theta a} = R_s \cdot \vec{i}_{s,dq} \cdot e^{j\theta} + \frac{d\vec{\lambda}_{s,dq}}{dt} \cdot e^{j\theta} + j \frac{d\theta}{dt} \cdot \vec{\lambda}_{s,dq} \cdot e^{j\theta da} \quad (2.17)$$

sehingga:

$$\vec{V}_{s,dq} = R_s \cdot \vec{i}_{s,dq} + \frac{d}{dt} \cdot \vec{\lambda}_{s,dq} + j\omega_e \cdot \vec{\lambda}_{s,dq} \quad (2.18)$$

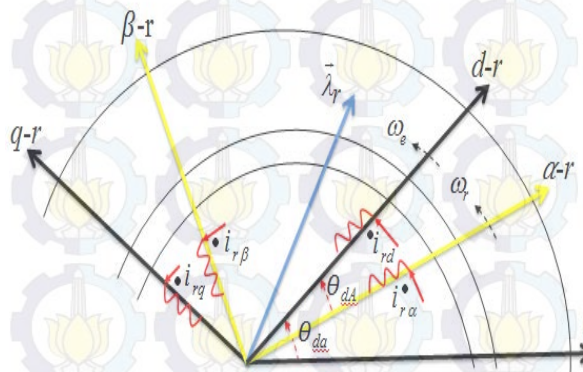
Dengan memisahkan real dan imajiner maka didapatkan tegangan stator d-q:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{ds} - \omega_e \cdot \lambda_{qs} \\ V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{qs} - \omega_e \cdot \lambda_{ds} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Kemudian untuk mencari persamaan tegangan d-q, kumparan rotor dapat ditunjukkan dengan persamaan (2.20) berikut ini:

$$\begin{aligned} V_{ar} &= R_s \cdot i_{ar} + \frac{d}{dt} \lambda_{ar} \\ V_{\beta r} &= R_s \cdot i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \lambda_{\beta r} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Atau dapat dilihat seperti Gambar 2.9. berikut ini:

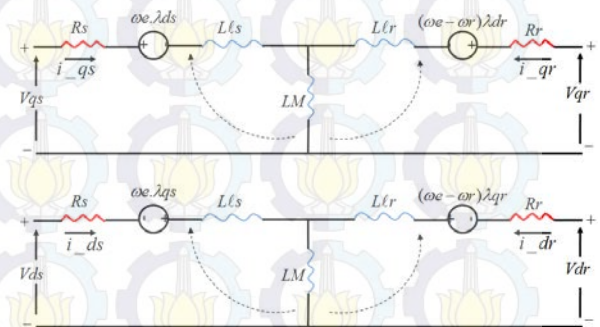


**Gambar 4** Rangkaian Ekuivalen rotor  $\alpha\beta$  dan d-q.

Dengan mengikuti cara mencari tegangan pada kumparan stator, maka didapatkan tegangan rotor d-q:

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_s \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{dr} - \omega_{dA} \cdot \lambda_{qr} \\ V_{qr} &= R_s \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \cdot \lambda_{qr} - \omega_{dA} \cdot \lambda_{dr} \end{aligned} \quad (2.21)$$

sehingga rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa dalam sumbu d-q dapat dilihat pada Gambar 5.



**Gambar 5** Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa Sumbu d-q

Berdasarkan rangkaian di atas maka dapat dituliskan persamaan tegangan pada stator dan rotor [11]

$$\begin{aligned} V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot \lambda_{ds} + p \cdot \lambda_{qs} \\ V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot \lambda_{qs} + p \cdot \lambda_{ds} \\ V_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{dr} + p \cdot \lambda_{qr} \\ V_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda_{qr} + p \cdot \lambda_{dr} \end{aligned}$$

di mana  $p = \frac{d}{dt}$ . Persamaan untuk fluks pada masing-masing kumparan dapat dinyatakan [11].

$$\begin{aligned} \lambda_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \lambda_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \end{aligned}$$



$$\lambda_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs}$$

(2.23)

$$\lambda_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds}$$

dengan,

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (2.25)$$

di mana,

$V_{qs}, V_{ds}$  = tegangan stator pada sumbu dq

(Volt)

$V_{qr}, V_{dr}$  = tegangan rotor pada sumbu dq

(Volt)

$i_{qs}, i_{ds}$  = arus stator pada sumbu dq

(Ampere)

$i_{qr}, i_{dr}$  = arus rotor pada sumbu dq

(Ampere)

$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$  = fluks stator pada sumbu dq

(Webber)

$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$  = fluks rotor pada sumbu dq

(Webber)

$R_s$  = tahanan stator (Ohm)

$R_r$  = tahanan rotor (Ohm)

$L_s$  = induktansi stator (Henry)

$L_r$  = induktansi diri rotor (Henry)

$L_m$  = induktansi mutual (Henry).

Dari nilai arus dan fluks yang sudah dipaparkan pada persamaan di atas, maka dapat dicari nilai torsi elektromagnetik yang dibangkitkan dengan menggunakan persamaan (2.27)

$$T_{em} = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})$$

di mana,

$T_{em}$  = Torsi elektromagnetik yang dibangkitkan (Nm)

P = Jumlah pasang kutub.

Untuk mencari besarnya kecepatan yang dihasilkan pada rotor ( $\omega_r$ ), dapat menggunakan persamaan (2.27) di mana pada persamaan tersebut terdapat hubungan antara torsi yang dibangkitkan ( $T_{em}$ ) dengan torsi beban ( $T_L$ )

$$T_{em} = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} = T_L + \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{T_{em} - T_L}{J_{eq}}$$

(2.27)

di mana,

$T_L$  = torsi beban (N.m)

$T_{em}$  = torsi elektromagnetik yang dibangkitkan (N.m)

J = momen inersia ( $\text{kg.m}^2$ )

P = jumlah pasang kutub

$\omega_r$  = kecepatan elektris rotor (rad/s)

$\omega_m$  = kecepatan mekanik rotor (rad/s)

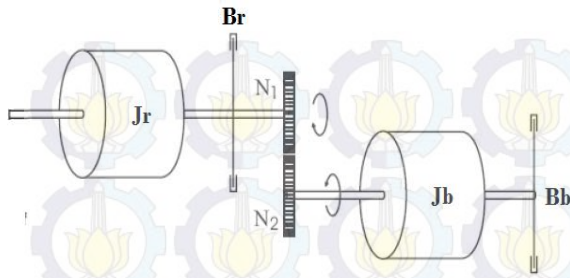
## 2.2.2 Model Dinamik Beban Motor

### Induksi

Torsi beban ( $T_L$ ) untuk model motor induksi menggunakan pembebanan pada poros beban, dapat dilihat pada Gambar 6

(2.26)





**Gambar 6** Model Dinamik Beban Inersia Dan Damper

Dengan persamaan matematika untuk model dinamik beban inersia dan damper sebagai berikut:

$$\tau_e - \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \left(B_b \omega_m + J_b \frac{d}{dt} \omega_m\right) - B_r \omega_m = J_r \frac{d}{dt} \omega_m \quad (2.30)$$

di mana:

$T_e$  = Torsi elektromagnetik yang dibangkitkan (Nm),

$J_r$  = Momen inersia motor (kg.m<sup>2</sup>),

$J_b$  = Momen inersia beban (kg.m<sup>2</sup>),

$N_1$  = Jumlah gigi pada roda gigi 1,

$N_2$  = Jumlah gigi pada roda gigi 2,

$B_m$  = Damber motor,

$B_b$  = Damper beban,

$\omega_m$  = Kecepatan mekanik rotor (rad/s).

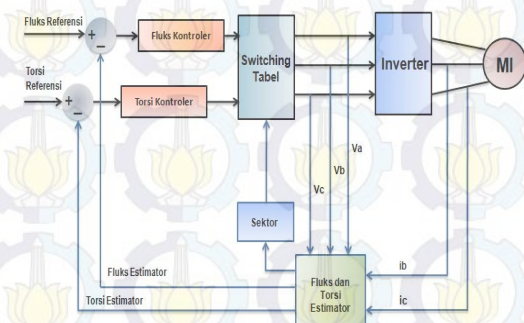
## 2.2 Direct Torque Control (DTC)

*Direct Torque Control* pertama kali dikembangkan oleh *Takahasi* dan *Noguchi* tahun 1986. Dasar dari metode DTC adalah perubahan torsi sebanding dengan

slip antara fluks stator dan fluks rotor pada kondisi fluks bocor stator tetap[3]. Pada motor induksi dengan tipe rotor sangkar untuk waktu tetap rotor menjadi sangat besar, fluks bocor berubah perlahan dibanding dengan perubahan fluks bocor stator. Oleh karena itu pada keadaan perubahan cepat fluks rotor cenderung tidak berubah. Perubahan cepat dari torsi elektromagnetik dapat dihasilkan dari putaran fluks stator, sebagai arah torsi.

Dengan kata lain fluks stator dapat seketika mempercepat atau memperlambat dengan menggunakan vektor tegangan stator yang sesuai. Torsi dan fluks kontrol bersama-sama dan decouple dicapai dengan pengaturan langsung dari tegangan stator, dari error respon torsi dan fluks.

DTC biasanya digunakan sesuai vector tegangan dalam hal ini untuk memelihara torsi dan fluks stator dengan dua daerah histerisis [3]. Rangkaian DTC dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12.



**Gambar 7** Diagram Blok Sistem DTC Motor Induksi Tiga Fasa



Gambar 2.11 menunjukkan bahwa *Direct Torque Control* (DTC) merupakan salah satu strategi vektor kontrol berdasarkan pengontrolan fluk dan torsi elektromagnetik secara langsung pada motor induksi dengan penentuan pemilihan vektor tegangan.

### 2.3 *Sliding Mode Control* (SMC)[13]

Dalam merumuskan berbagai persoalan kontrol, biasanya akan ditemui ketidaksesuaian antara *plant* yang sebenarnya dengan model yang dibangun untuk mendesain pengaturan. Ketidaksesuaian ini bisa disebabkan karena terjadinya perubahan parameter sistem atau karena penyederhanaan yang diambil untuk memodelkan kelakuan sistem yang kompleks. Karena itu di dalam mendesain pengaturan haruslah dipertimbangkan faktor adanya ketidaksesuaian tersebut diatas, sehingga kinerja sistem kontrol yang diharapkan dapat tercapai. Penelitian tentang hal ini telah memicu berkembangnya teori kontrol kokoh (*robust control*) dan kontrol adaptif (*adaptive control*). Metode kontrol modulus luncur (*Sliding Mode Control*, SMC) merupakan salah satu metode kontrol yang memiliki sifat kekokohan [5].

Ide awal metode modulus luncur dikemukakan oleh Itkis dan Utkin. Metode ini dikembangkan dengan maksud untuk memecahkan masalah dalam sistem

kontrol yang timbul akibat adanya ketidakakuratan model sistem. Pengguna metode modulus luncur, terutama pada sistem kontrol non linier, pada dasarnya merupakan pendekatan yang sederhana dari sistem kontrol kokoh (*robust control*). *Sliding Mode Control* pada intinya adalah memilih suatu masukan sinyal kontrol (*control input*,  $u(t)$ ) tertentu untuk sistem yang akan dikontrol, terutama sistem non linier, yang akan membawa dinamika sistem masuk kedalam suatu permukaan luncur (*sliding surface*), dan selanjutnya akan menyebabkan status sistem meluncur (*sliding*) ke titik seimbang. *Sliding Mode Control* merupakan sebuah kontrol umpan balik pensakralan berkecepatan tinggi yang efektif dan kokoh dalam mengontrol sistem linier dan sistem non linier. Sistem kontrol ini kokoh karena menyediakan sebuah metode perancangan sistem yang tidak peka terhadap ketidakpastian parameter lingkungan dan gangguan luar.

Pada prinsipnya *Sliding Mode Control* menggunakan sebuah hukum kontrol pensakralan berkecepatan tinggi untuk membawa *trajektori* status dari sistem linier atau sistem non linier ke dalam sebuah permukaan (*hyperplane*) tertentu dalam ruang status (disebut permukaan luncur / *sliding surface*), kemudian *trajektori* status tersebut dipelihara agar tetap meluncur pada permukaan tersebut. Proser pemeliharaan



*trajektori* status pada permukaan luncur mengakibatkan terjadinya osilasi pada permukaan luncur. Osilasi ini sering disebut *chattering*. Fenomena *chattering* pada permukaan luncur akan berdampak pada stabilitas dari sistem kontrol.

Pada *Sliding Mode Control*, waktu yang dibutuhkan oleh status dalam mencapai permukaan luncur akan berdampak terhadap kecepatan tanggapan sistem terhadap waktu. Waktu yang dibutuhkan oleh status dalam mencapai permukaan luncur sering disebut dengan *Hitting Time*. Salah satu keuntungan dari *Sliding Mode Control* adalah ketika sistem mengenai permukaan luncur, maka sistem tersebut tidak akan peka terhadap ketidakpastian parameter lingkungan dan gangguan luar. Untuk menjaga perilaku sistem sehingga tidak peka terhadap perubahan lingkungan, maka dibutuhkan *Hitting Time* yang kecil agar sistem cepat mengenai permukaan luncur. *Hitting Time* dan *Chattering* yang kecil dua hal yang sangat penting dalam merancang sistem *Sliding Mode Control*.

## 2.4 Algoritma Genetika [14]

*Algoritma Genetika* merupakan suatu metode yang menggunakan seleksi alam yang merupakan bagian utama dari prinsip evolusi sebagai dasar pemikiran untuk menyelesaikan suatu permasalahan. Prinsip ini dikemukakan oleh Charles

Darwin, di mana tanpa menghiraukan prinsip dasar penurunan sifat, Darwin mengemukakan penggabungan kualitas induk pada generasi berikutnya, di samping itu bahwa individu yang mampu beradaptasi dengan lingkungannya akan mempunyai kesempatan hidup yang lebih besar. Penggunaan prinsip genetika pada komputer dimulai pada tahun 1950 ketika beberapa ahli Biologi menggunakan komputer untuk simulasi sistem biologi. Akhir tahun 1975 John Holland dari Universitas Michigan melalui paper yang berjudul “*Adaption in Natural and Artificial System*” menggunakan konsep dasar *Algoritma Genetika*. *Algoritma Genetika* bekerja dengan suatu populasi string dan melakukan proses pencarian nilai optimal secara parallel, dengan menggunakan operator genetika. *Algoritma Genetika* akan melakukan rekombinasi antar individu. Algoritma genetika memiliki elemen dasar berupa string yang tersusun dari rangkaian substring (gen), yang masing-masing merupakan kode dari parameter dalam ruang solusi dimana suatu string (kromosom) menyatakan kandidat solusi. Kumpulan string dalam populasi berkembang dari generasi ke generasi melalui operator genetika. Pada setiap iterasi, individu-individu (Kromosom) dalam populasi itu akan dievolusi dan diseleksi untuk menentukan populasi pada generasi berikutnya.



Populasi ini akan terus berulang sampai menemukan suatu parameter dengan nilai yang paling optimal sesuai dengan yang diinginkan.

### 1.5.1 Aplikasi Algoritma Genetika

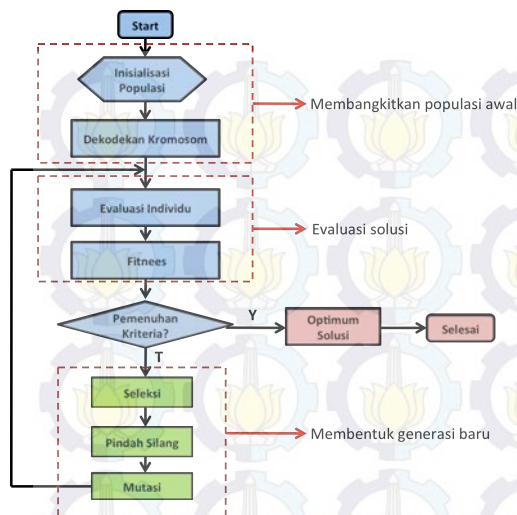
Sejak pertama kali dirintis oleh John Holland, *Algoritma Genetika* telah dipelajari, diteliti dan diaplikasikan secara luas pada berbagai bidang. Algoritma Genetika banyak digunakan pada masalah praktis yang berfokus pada pencarian parameter-parameter yang optimal. Namun demikian, *Algoritma Genetika* juga dapat digunakan untuk memecahkan masalah-masalah selain optimasi. Selama suatu masalah berbentuk adaptasi (alami maupun buatan), maka dapat diformulasikan dalam terminologi genetika.

*Algoritma Genetika* merupakan teknik *search stochastic* yang berdasarkan mekanisme seleksi alam dan genetika natural. Pada algoritma genetika, teknik pencarian dilakukan sekaligus atas sejumlah solusi yang mungkin dikenal dengan istilah populasi. Setiap individu di dalam populasi disebut kromosom, yang merepresentasikan suatu penyelesaian terhadap masalah yang ditangani. Sebuah kromosom terdiri dari sebuah string yang berisi berbagai simbol, dan biasanya, tetapi tidak mutlak, string tersebut berupa sederetan bit-bit biner “0” dan “1”. Sebuah kromosom tumbuh atau berkembang biak

melalui berbagai iterasi yang berulang-ulang, dan disebut sebagai generasi. Pada setiap generasi, berbagai kromosom yang dihasilkan akan dievaluasi menggunakan suatu pengukuran fitness. Nilai *fitness* dari suatu kromosom akan menunjukkan kualitas dari kromosom dalam populasi tersebut. Generasi berikutnya dikenal dengan istilah anak (offspring) terbentuk dari gabungan dua kromosom generasi sekarang yang bertindak sebagai induk (parent) dengan menggunakan operator penyilangan (crossover). Selain operator penyilangan, suatu kromosom dapat juga dimodifikasi dengan menggunakan operator mutasi. Populasi generasi yang baru dibentuk dengan cara menyeleksi nilai fitness dari kromosom induk (parent) dan nilai fitness dari kromosom anak (offspring), serta menolak kromosom-kromosom yang lainnya sehingga ukuran populasi (jumlah kromosom dalam suatu populasi) konstan. Setelah melalui beberapa generasi, maka algoritma ini akan konvergen ke kromosom terbaik [15].

Secara skematis, siklus algoritma genetika dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.22.





**Gambar 8** Stuktur Umum *Algoritma Genetika* [14].

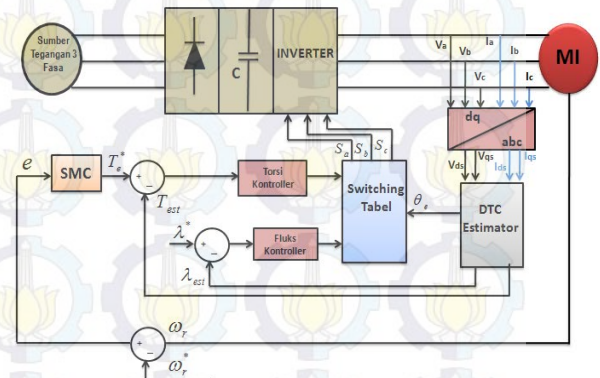
### 3. PERANCANG SISTEM

Pada bab ini akan dibahas mengenai tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses perancangan sistem secara detail. Proses perancangan yang dilakukan meliputi proses perancangan simulasi dari model matematika motor induksi, perancangan simulasi *Direct Torque Control* (DTC), perancangan simulasi pemodelan identifikasi motor induksi dengan DTC, dan yang terakhir yaitu perancangan simulasi kontroler *Sliding Mode Control* (SMC) Berbasis *Algoritma Genetika*. Seluruh perancangan yang dilakukan menggunakan program *Simulink* MATLAB. Alur pengerjaan perancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 3.1.

#### 3.1 Gambaran Umum Sistem

Secara keseluruhan sistem dapat digambarkan dalam diagram blok agar

mudah untuk memahami cara kerja dan bagian-bagian sistem yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



**Gambar 9** Diagram Blok Sistem Keseluruhan

Gambar diagram blok di atas menunjukkan bahwa, keluaran inverter berupa tegangan tiga phase sebagai masukan untuk motor induksi kemudian tegangan dan arus stator pada motor induksi yaitu  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  dan  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  akan ditransformasi oleh blok  $abc$  ke  $dq$  menggunakan persamaan (3.1) dengan maksud untuk mengubah koordinat motor induksi dari 3 phase ke dalam koordinat 2 phase. Hasil dari tranformasi berupa tegangan  $d_s$ ,  $q_s$  dan arus  $d_s$ ,  $q_s$  inilah sebagai masukan untuk blok DTC estimator, sehingga keluaran dari DTC estimator yaitu torsi estimator akan dibandingkan dengan torsi error referensi (torsi hasil kontroler SMC-GA) dan fluks estimator akan dibandingkan dengan fluks referensi sedangkan sudut fluks stator



sebagai masukan untuk blok *switching table* gunanya untuk mengontrol fluks stator dan torsi untuk memenuhi nilai referensi yang telah ditentukan. Selanjutnya putaran motor akan dibandingkan dengan putaran referensi dan hasil perbandingan inilah nantinya akan dikontrol menggunakan metode SMC-GA.

### 3.2 Perancangan Simulasi Model Motor Induksi

Tahapan awal dalam melakukan perancangan sistem setelah melakukan studi literatur adalah mendapatkan model matematis dari *plant* yaitu motor induksi, agar *plant* tersebut dapat disimulasikan pada *software* yang digunakan dan untuk mengetahui karakteristik dari *plant*. Model matematis dari motor induksi yang digunakan dalam perancangan ini didapatkan dari persamaan (2.29) yaitu:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} - \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

Kemudian persamaan (2.29) akan digunakan untuk mencari nilai arus dari motor induksi. Dalam model matematis motor induksi terdapat nilai tahanan dan induktansi yang harus diketahui sebagai parameter. Selain nilai tahanan dan induktansi, pada perancangan simulasi

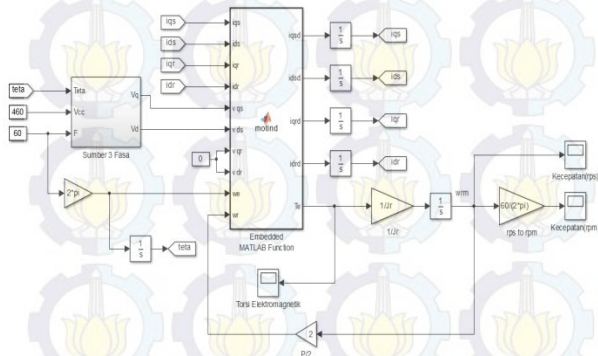
motor induksi diperlukan parameter-parameter motor induksi lainnya seperti nilai inerti, jumlah kutub, dan lain-lain. Parameter motor induksi yang digunakan pada perancangan dan simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Parameter Motor Induksi 3 HP [11].

No.	Nama (Satuan)	Nilai
1.	Tenaga motor (HP)	3/2,4 kW
2.	Tegangan motor (line to line) (Volt)	460
3.	Frekuensi (Hz)	60
4.	Jumlah kutub	4
5.	Tahanan stator (Ohm)	1,77
6.	Tahanan rotor (Ohm)	1,34
7.	Induktansi stator (mH)	0,3829
8.	Induktansi rotor (mH)	0,3811
9.	Induktansi magnetic (mH)	0,369
10.	Momen inersia (kg.m <sup>2</sup> )	0,025
11.	Arus beban penuh (A)	4
12.	Kecepatan beban penuh (RPM)	1750
13.	Efisiensi beban penuh (%)	88,5
14.	Faktor daya (%)	80
15.	Slip beban penuh (%)	1,72



Setelah mengetahui persamaan model matematis dari *plant* (motor induksi) dan parameter dari motor induksi, tahap selanjutnya yaitu menyajikan persamaan model matematis tersebut dalam bentuk fungsi dan *simulink* MATLAB. Perancangan simulasi motor induksi yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.3. berikut ini:



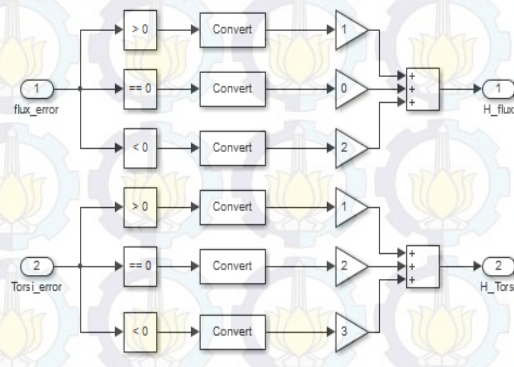
**Gambar 10** Perancangan Simulasi Model Motor Induksi

Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa simulasi yang dirancang secara garis besar terdiri dari dua blok salah satunya blok *Embedded MATLAB Function* yang berfungsi untuk memasukkan fungsi dari persamaan model matematis dan parameter dari motor induksi.

### 3.2.1 Perancangan Kontroler Histerisis

Pada pembahasan sebelumnya kontroler histerisis digunakan untuk mendapatkan nilai kesalahan fluks dan torsi pada daerah histerisisnya. Nilai

kesalahan (*error*) ini digunakan sebagai masukan komparator yang nantinya diolah menjadi nilai level histerisis, yaitu dua level histerisis untuk fluks dan tiga level histerisis untuk torsi. Hasil perancangan kontroler histerisis baik untuk fluks maupun torsi dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 11** Perancangan Kontroler Histerisis Fluks dan Torsi DTC

Dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa setiap nilai kesalahan fluks ( $\Delta\psi_s$ ) dan kesalahan torsi ( $\Delta T_e$ ) akan dibandingkan dengan nilai nol (0). Jika nilai kesalahan lebih besar daripada 0 maka nilai fluks dan torsi akan menghasilkan sinyal keluaran sebesar 1. Jika nilai kesalahan kurang dari 0 maka fluks akan menghasilkan sinyal keluaran sebesar 2 dan torsi akan menghasilkan sinyal keluaran sebesar 3. Kondisi terakhir jika nilai kesalahan fluks dan torsi bernilai 0 maka fluks akan menghasilkan sinyal keluaran 0 yang artinya motor akan berhenti sehingga nilai fluks stator tidak boleh sama dengan 0,

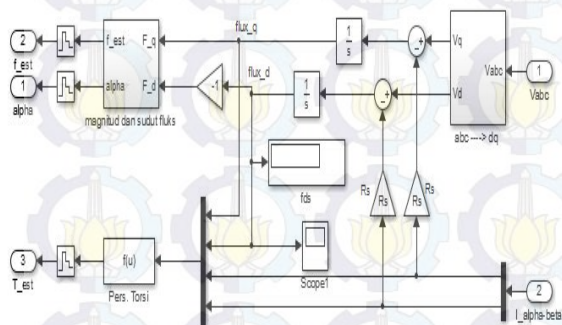


keluaran sebesar 2.

### 3.2.2 Perancangan Estimator

Salah satu kelebihan dari DTC adalah bisa dilakukan tanpa menggunakan sensor kecepatan, dan sebagai gantinya maka digunakan blok estimator. Pada estimator ini dihitung besarnya nilai fluks dan torsi sebagai umpan balik nilai fluks dan torsi referensi. Selain itu dihitung juga besarnya sudut dari fluks stator (sektor). Nilai torsi estimasi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.8), sedangkan nilai magnitud dan sudut fluks stator estimasi dihitung dengan menggunakan persamaan (2.31), dan (2.32).

Hasil perancangan estimator DTC dapat dilihat pada Gambar 3.5.



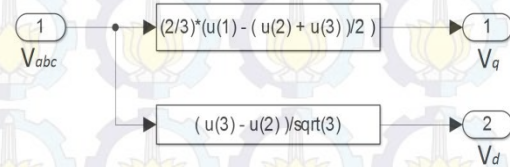
**Gambar 12** Perancangan Estimator DTC

Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa estimator menerima sinyal masukan dari tegangan yang dihasilkan oleh inverter berupa tegangan tiga fasa dan arus 2 fasa dari motor induksi. Sinyal masukan

tegangan tiga fasa harus diubah ke dalam tegangan 2 fasa karena dalam menentukan magnitud dan sudut fluks stator yang dibutuhkan adalah tegangan dalam frame dua fasa (d-q). Persamaan yang digunakan untuk mengubah tegangan tiga fasa menjadi tegangan dua fasa dapat dilihat pada persamaan (3.1).

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Persamaan (3.1) digunakan untuk membuat blok ‘abc--→dq’ pada blok estimator dan dibuat dalam fungsi MATLAB untuk perancangan simulasinya seperti pada Gambar 3.6.



**Gambar 13** Transformasi Tegangan Dari abc ke dq

### 3.2.3 Perancangan Sektor Sudut Fluks Stator

Perancangan sektor sudut fluks stator bertujuan untuk mengubah besarnya sudut fluks stator ( $\alpha$ ) menjadi dalam bentuk sektor. Sektor sudut fluks stator dibagi menjadi enam dan masing-masing sektor

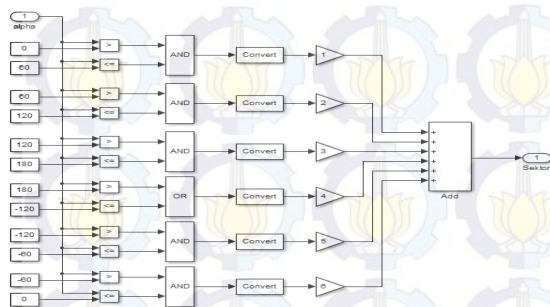


besarnya  $60^0$ . Besarnya masing-masing sektor dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Sektor Sudut Fluks Stator

No.	Sektor (Simbol)	Besar
1.	1 ( $\alpha(1)$ )	$> 0^0 - < 60^0$
2.	2 ( $\alpha(2)$ )	$> 60^0 - < 120^0$
3.	3 ( $\alpha(3)$ )	$> 120^0 - < 180^0$
4.	4 ( $\alpha(4)$ )	$> 180^0 - < (-120^0)$
5.	5 ( $\alpha(5)$ )	$> (-120^0) - < (-60^0)$
6.	6 ( $\alpha(6)$ )	$> (-60^0) - < 0^0$

Dari data Tabel 3.2. dapat dibuat rancangan simulasi sektor sudut fluks stator yang dapat dilihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 14** Perancangan Sektor Sudut Fluks

Dari Gambar 14 dapat dilihat bahwa sinyal masukan berupa besarnya sudut fluks stator yang dihasilkan estimator akan ditentukan letaknya sesuai sektornya. Nilai sudut fluks stator akan dibandingkan nilainya dengan besarnya sudut untuk masing-masing sektor. Sektor sudut fluks

stator ditentukan dari posisi nilai sudut fluks stator itu berada sesuai dengan batas untuk masing-masing sektor pada Tabel 3.2. Sinyal keluaran berupa nilai satu sampai enam yang masing-masing mewakili nilai keenam sektor.

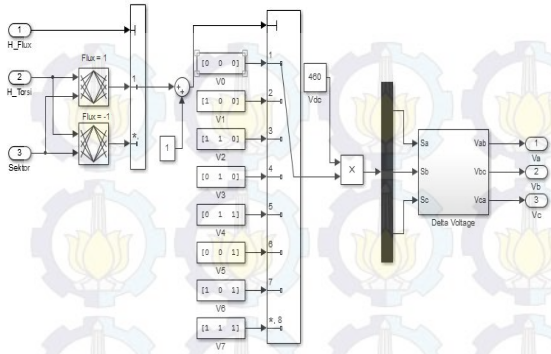
### 3.2.4 Perancangan Tabel *Switching*

Tiga faktor yang mempengaruhi tabel *switching* yaitu besarnya histerisis fluks stator, besarnya histerisis torsi dan sektor sudut fluks stator yang aktif. Nilai histerisis fluks stator dan torsi didapatkan dari sinyal keluaran komparator sedangkan sektor sudut fluks didapatkan dari sinyal keluaran blok sektor sudut fluks stator.

Konsep utama dari DTC adalah untuk menghasilkan vektor tegangan yang aktif secara bergantian untuk masukan inverter sehingga tegangan masukan pada motor induksi merupakan sinyal sinusoidal. Dapat dikatakan bahwa tabel *switching* yang sangat menentukan vektor tegangan mana yang akan aktif secara bergantian. Tabel *switching* dapat dilihat pada Tabel 2.2, di mana pada tabel tersebut disajikan aturan vektor tegangan mana saja yang akan aktif sesuai dengan kondisi sinyal masukan.

Hasil perancangan simulasi dari data tabel *switching* dapat dilihat pada Gambar 3.8.





**Gambar 15** Perancangan Tabel Switching

Berdasarkan Gambar 15 aturan pada Tabel 2.2. untuk menghasilkan vektor tegangan mana yang akan aktif dimasukkan pada blok ‘look-up table’ yang terbagi menjadi dua, yaitu untuk kondisi ketika nilai fluks = 1 dan kondisi nilai fluks = (-1). Pada simulasi ini, sinyal keluaran yang dihasilkan berupa tegangan tiga fasa yang digunakan untuk menyuplai tegangan pada motor induksi dan sebagai masukan pula untuk blok estimator.

### 3.3 Perancangan Kontroller *Sliding Mode Control* (SMC)

Kontroler dirancang untuk mengatasi masalah pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa. Metode yang diajukan adalah metode kontrol *Sliding Mode Control* (SMC) berbasis *Algoritma Genetika*, dimana *Algoritma Genetika* dirancang untuk masalah optimalisasi parameter *Sliding Mode Control* (SMC).

Langkah awal untuk mendapatkan persamaan persamaan *Sliding Mode Control* (SMC) adalah dengan mengambil

hukum kontrol Lyapunov yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{V}_i = s^T \dot{s} < 0 \quad (3.3)$$

di mana  $s$  adalah *sliding surface* atau permukaan luncur.

*Sliding Mode Control* terdiri dari penjumlahan dua sinyal kontrol, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$u = u_n + u_{eq} \quad (3.4)$$

di mana  $u_{eq}$  adalah sinyal kontrol ekuivalen yang berperan untuk memindahkan *state* ke titik referensi, dan sinyal kontrol natural  $u_n$  berperan untuk menjaga sistem tetap berada pada referensi dengan permukaan luncur  $s=0$ .

Untuk mendapatkan sinyal kontrol ekuivalen, definisikan *error* putaran rotor yang merupakan beda antara posisi wahana dengan target dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$e = \omega - \omega_{ref} \quad (3.5)$$

dengan  $\omega_{ref}$  adalah sinyal referensi. Langkah berikutnya adalah menentukan fungsi permukaan luncur (*Sliding Surface*), permukaan luncur didefinisikan oleh

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (3.6)$$



Untuk membuat permukaan luncur menuju 0 pada waktu tak hingga, maka diturunkan  $s$  terhadap waktu, didapatkan persamaan:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = 0 \quad (3.7)$$

Substitusi  $e$  dengan Persamaan (3.5) maka akan didapatkan persamaan:

$$\dot{s} = \ddot{\omega} - \ddot{\omega}_{ref} + \lambda \dot{e} = 0 \quad (3.8)$$

Turunan pertama untuk mendapatkan  $\dot{\omega}_r$ :

$$\omega_r \frac{du}{dt} = \dot{\omega}_r$$

(3.9)

Kemudian turunan kedua untuk mendapatkan  $\ddot{\omega}_r$ :

$$\dot{\omega}_r \frac{du}{dt} = \ddot{\omega}_r$$

(3.10)

Turunan ketiga untuk mendapatkan  $\dot{e}$  yaitu dengan persamaan (3.11)

$$e \frac{du}{dt} = \dot{e}$$

(3.11)

Untuk menentukan sinyal kontrol ekuivalen  $u_{eq}$  didapatkan persamaan:

$$u_{eq} = \left( \ddot{\omega}_r - \dot{e} \lambda \left( \frac{1}{100s+1} \right) \right) J_{eq} \quad (3.12)$$

Selanjutnya menentukan sinyal kontrol natural  $u_n$  dapat ditulis dengan persamaan:

$$u_n = \left( K \cdot \text{sign} \left( \lambda e + \dot{e} \left( \frac{1}{100s+1} \right) \right) - \lambda \right)$$

(3.13)

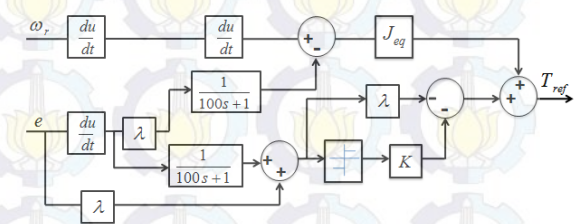
sehingga jika dijumlahkan kedua sinyal kontrol tersebut untuk mendapatkan sinyal referensi atau  $T_{ref}$  sebagai masukan untuk sistem maka didapatkan persamaan (3.14) sebagai berikut:

$$T_{ref} = \left( \ddot{\omega}_r - \dot{e} \lambda \left( \frac{1}{100s+1} \right) \right) J_{eq} +$$

$$\left( K \cdot \text{sign} \left( \lambda e + \dot{e} \left( \frac{1}{100s+1} \right) \right) - \lambda \right)$$

(3.14)

Dengan persamaan (3.14) jika dibuat dalam bentuk blok diagram dapat dilihat seperti pada Gambar 3.11.

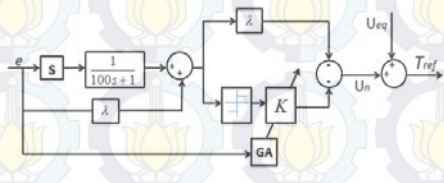


**Gambar 16** Diagram Blok Kontroler *Sliding Mode Control* (SMC)

Kemudian persamaan (3.11) digunakan untuk membuat blok *Sliding Mode Control* (SMC) dibuat dalam fungsi



seperti pada Gambar 3.12.



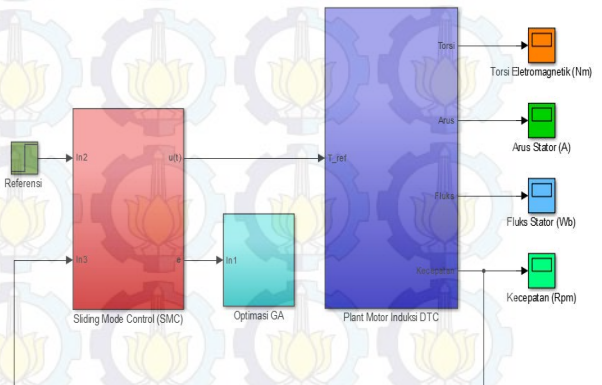
**Gambar 17** Diagram Blok Optimasi *Algoritma Genetika* Pada Parameter SMC.

Gambar 17 diagram blok di atas, dapat dijelaskan bahwa *error* hasil perbandingan putaran motor dengan referensi adalah sebagai input untuk *Algoritma Genetika* kemudian *error* tersebut dievaluasi untuk optimasi parameter *Sliding Mode Control* (SMC) yaitu *gain K*. Proses optimasi ini dilakukan secara *off-line*. Gambar 3.13.

Gambar 3.14 dapat dilihat bahwa, terdapat dua sub-sistem, sub-sistem yang pertama adalah rangkaian kontroler SMC dan sub-sistem yang kedua adalah optimasi *Algoritma Genetika* yang berfungsi untuk memasukkan sebuah fungsi solusi dari *Algoritma Genetika* mencari solusi suatu permasalahan dengan langkah awal membangkitkan sebuah populasi.

### 3.4 Perancangan Kontroler SMC Algoritma Genetika dengan Plant Model Motor Induksi

Blok kontroler perancangan evaluasi performansi error sudah didapatkan pada perancangan kontroler *Sliding Mode Control* (SMC) maka akan digunakan sebagai kontroler pada *plant* model motor induksi dengan *Direct Torque Control* (DTC). Hasil perancangan kontroler SMC dengan *plant* model motor induksi dengan *Direct Torque Control* (DTC) dapat dilihat pada Gambar 18



**Gambar 18** Perancangan Kontroler SMC  
*Algoritma Genetika* dengan *Plant Model*  
Motor Induksi

Dari Gambar 18, dapat dilihat bahwa, secara garis besar simulasi terdiri dari tiga sub-sistem, ketiga sub-sistem ini adalah hasil penyederhanaan dari beberapa sub-sistem. Sub-sistem yang berwarna merah adalah kontroler *Sliding Mode Control* (SMC), sedangkan sub-sistem yang berwarna biru muda adalah optimalisasi *Algoritma Genetika* dan yang berwarna biru tua adalah *Plant* Motor Induksi dengan *Direct Torque Control* (DTC).



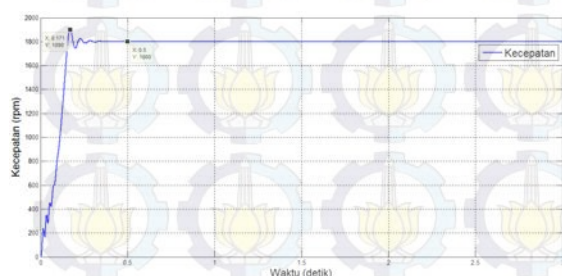
Pada simulasi ini, nilai acuan/referensi untuk fluks stator ditentukan sebesar 1.46 wb, sedangkan nilai acuan/referensi untuk kecepatan sebesar 1000 rpm. Nilai referensi kecepatan inilah yang nantinya dijadikan acuan untuk nilai respon keluaran sistem yang diinginkan. Adapun respon yang akan diamati adalah kecepatan, torsi elektromagnetik, arus stator dan fluks stator.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai simulasi dari hasil perancangan sistem pada BAB III. Setelah dilakukan simulasi kemudian dilakukan analisis terhadap data hasil simulasi apakah sesuai dengan target dari tujuan penelitian.

##### 4.1 Simulasi Model Motor Induksi

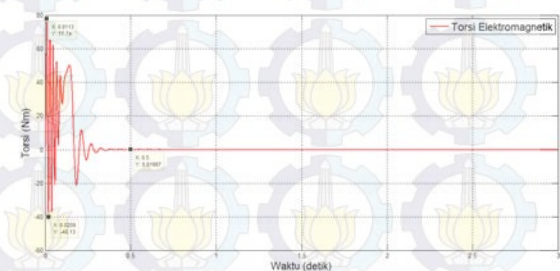
Pada simulasi ini dilakukan pengujian dari perancangan model motor induksi yang telah dibahas pada bab sebelumnya yaitu perancangan sistem yang terdapat pada Gambar 3.1. Pada simulasi ini hanya dilihat respon kecepatan dan torsi. Pada pengujian ini motor induksi dioperasikan dengan beban dan tanpa beban.



#### Gambar 19 Respon Kecepatan Rotor

Model Motor Induksi Tanpa Beban

Gambar 19. menunjukkan respon putaran rotor motor induksi terdapat *overshoot* yang cukup besar ketika  $t = 0.171$  detik, nilai maksimum *overshoot* yaitu 5.4111%. Dan ketika  $t = 0.5$  detik, nilai kecepatan rotor 1800 rpm, pada saat inilah kecepatan rotor motor induksi mencapai *steady state*. Nilai kecepatan ini merupakan kondisi ketika motor induksi tanpa beban.



#### Gambar 20 Respon Torsi Elektromagnetik

Model Motor Induksi Tanpa Beban

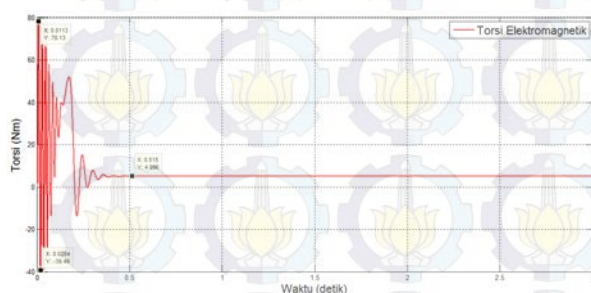
Respon torsi elektromagnetik yang terlihat pada Gambar 20. dapat kita lihat bahwa pada saat *start*, nilai *overshoot* yang dibangkitkan sangat besar yaitu -40.13 Nm sampai 77.74 Nm, akan tetapi nilai *overshoot* tersebut akan terus mengecil sampai  $t = 0.5$  detik atau pada saat *steady state*, hal ini disebabkan karena nilai arus *starting* motor yang dibangkitkan besar. Gambar 4.3. merupakan respon putaran rotor motor induksi saat diberi beban.





**Gambar 21** Respon Kecepatan Rotor Model Motor Induksi Berbeban

Respon kecepatan rotor pada motor induksi yang terlihat pada Gambar 21. dimana respon putaran rotor motor induksi terdapat masih terdapat *overshoot* ketika  $t = 0.2028$  detik, namun nilai maksimum *overshoot* lebih kecil jika dibandingkan sebelumnya. Ketika  $t = 0.5$  detik, nilai kecepatan rotor mengalami penurunan dari yang sebelumnya (1800 rpm) yaitu 1792 rpm, pada saat inilah kecepatan rotor motor induksi mencapai *steady state*. hal ini dikarenakan adanya torsi beban, torsi beban yang diterapkan adalah sebesar 5 Nm. Gambar 4.4. adalah respon torsi motor induksi.



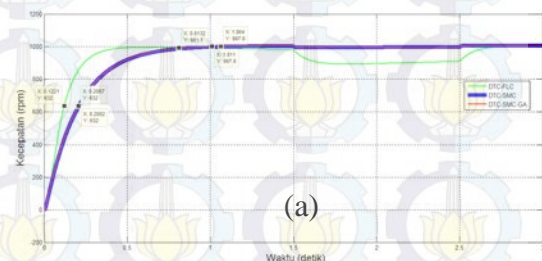
**Gambar 22** Respon Torsi Elektromagnetik Model Motor Induksi Berbeban

Respon torsi elektromagnetik yang terlihat pada Gambar 22 dapat kita lihat

bahwa pada saat *start*, nilai *overshoot* yang dibangkitkan sebesar -39.49 Nm sampai 78.13 Nm, lebih besar dari yang sebelumnya, hal ini sesuai dengan teori karakteristik torsi motor. Nilai *overshoot* tersebut akan terus mengecil sampai  $t = 0.5$  detik, di mana pada saat ini nilai torsi beban sebesar 5 Nm sesuai yang diterapkan. Pada saat waktu 0.5 detik, respon torsi mencapai *steady state*.

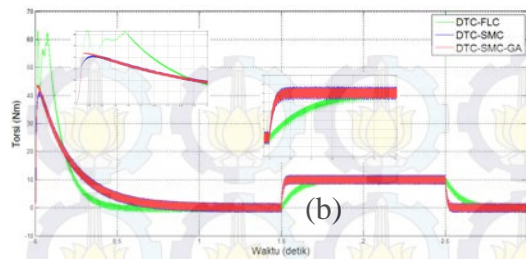
#### 4.2 Simulasi Perbandingan Respon Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Kontroler Berbeda

Perbandingan respon kecepatan motor induksi dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem. Pada simulasi ini kita ingin melihat respon putaran motor terhadap perubahan torsi beban, dengan nilai acuan/referensi untuk kecepatan berbeda-beda. Nilai referensi kecepatan inilah yang nantinya dijadikan acuan untuk nilai respon keluaran sistem yang diinginkan. Gambar 23 menunjukkan respon kecepatan dan torsi motor induksi.



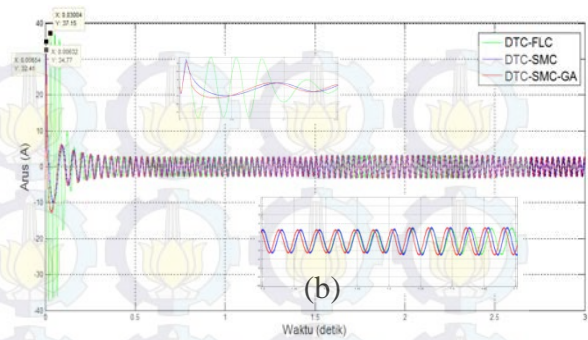
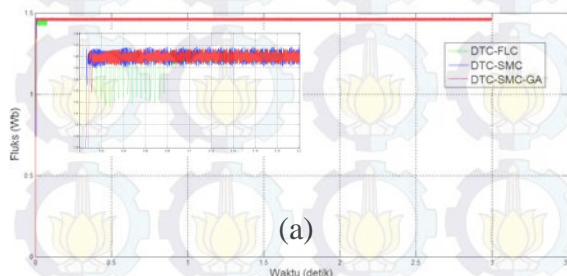
(a)





**Gambar 23** (a) Respon Kecepatan (b) Respon Torsi (Motor Induksi dengan DTC-FLC, DTC-SMC dan DTC-SMC-GA, dengan kecepatan referensi 1000 rpm).

Gambar 23. menunjukkan respon kecepatan dan torsi motor induksi ketika diberi beban sebesar 10 Nm, diterapkan pada 1.5 detik dan beban dihilangkan pada 2.5 detik dengan menggunakan kontroler yang berbeda yaitu DTC-FLC, DTC-SMC dan DTC-SMC-GA dengan referensi kecepatan 1000 rpm. Respon kecepatan dengan DTC-SMC dan DTC-SMC-GA terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan DTC-FLC, namun pada respon torsi jika diamati terdapat perbedaan yaitu fluktuasi *ripple* minimum. Dan untuk respon fluks stator dan arus stator dapat dilihat pada Gambar 4.18.



**Gambar 24** (a) Respon Fluks Stator (b) Respon Arus Stator (Motor Induksi dengan DTC-FLC, DTC-SMC dan DTC-SMC-GA, dengan kecepatan referensi 1000rpm).

Gambar 24. menunjukkan respon fluks stator dan arus stator pada motor induksi dengan kontroler berbeda, di mana pada DTC-FLC pada saat *steady state* awal fluktuasi *ripple* fluks yang dibangkitkan sangat besar, begitu juga dengan arus *starting* awal yang dibangkitkan sekitar 37.15A dan waktu *steady state* lebih lama dibandingkan dengan menggunakan kontroler DTC-SMC dan DTC-SMC-GA.

## 5.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan, simulasi dan analisis hasil simulasi maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Proses pengontrolan model motor induksi DTC dengan kontroler SMC berbasis *Algoritma Genetika* dapat memberikan respon kecepatan rotor yang membentuk grafik respon seperti karakteristik sistem orde pertama. Selain itu grafik respon mampu mencapai nilai kecepatan acuan yang diberikan yaitu 1000, 1100 dan 1200 rad/m dengan



rata-rata *settling time* yaitu 0,5618

detik.

2. Desain DTC-SMC berbasis *Algoritma Genetika* dapat meminimalkan fluktuasi *ripple* torsi pada saat *steady state* yaitu sebesar 2.594 Nm jika dibandingkan dengan DTC-SMC tanpa *Algoritma Genetika* fluktuasi *ripple* torsi yang dibangkitkan sebesar 3.201 Nm.
3. Penggunaan kontroler DTC-SMC berpengaruh terhadap respon fluks stator dimana pada saat *steady state* awal fluktuasi *ripple* yang dibangkitkan kecil yaitu 0.017 Wb. Nilai 0.017 Wb tersebut masih bisa diminimalisasi dengan DTC-SMC berbasis *Algoritma Genetika* yaitu sebesar 0.014 Wb.
4. Dengan digunakan kontroler DTC-SMC dan DTC-SMC berbasis *Algoritma Genetika* respon kecepatan motor induksi hampir tidak mengalami perubahan kecepatan dari referensi yang diberikan pada saat terjadi perubahan beban, dan waktu respon kecepatan dan torsi mencapai *steady state* lebih cepat. Saat diterapkan beban pada saat waktu 1.5 detik respon torsi mencapai *steady state* yaitu 1.55 detik, sedangkan pada DTC-FLC respon torsi mencapai *steady state* yaitu 1.68 detik.

## 5. PENUTUP

### 5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka penulis menyarankan untuk penelitian ke depannya:

1. Karena penelitian ini hanya bersifat simulasi dari model matematis motor induksi dan komponen peralatan lainnya, maka penelitian ke depan perlu diimplementasikan dan diujicobakan langsung pada peralatan dan komponen yang real.
2. Untuk mendapatkan performa yang lebih baik lagi sistem pengaturan kecepatan motor induksi dengan kontroler SMC dapat dikombinasikan dengan *Fuzzy Logic Controller* (FLC), agar supaya respon *transient* cepat mencapai *steady state*.
3. Perlu pengkajian yang lebih mendalam dalam menerapkan *Algoritma Genetika* dalam optimasi parameter SMC supaya mendapatkan hasil yang lebih baik lagi.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mochammad Rameli .(2014), "Bahan Kuliah Pegaturan Mesin



- Listrik: Motor Listrik”. Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [2] Mochammad Rameli. (2014), “Bahan Kuliah Pegaturan Mesin Listrik: Pengaturan Vektor Motor Induksi”. TekniK Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [3] Ramesh, T., Panda, K. A. (2012), “Direct Flux and Torque Control of There Phase Induction Motor Drive Using PI and Fuzzy Logic Controllers for Speed Controller for Regulator and Low Torque Ripple ”. Department of Electrical Engineering, National Institute of Tecnology, India.
- [4] Hu, F.C., Hong, B. R., Liu, H.C. (2014), “Stability analysis and PI controller tuning for a speed sensorless vector-controlled induction motor drive”, *30th Annual Conference of IEEE Inds. Elec. Society, IECON*, vol.1, 2-6 Nov, Korea.
- [5] Ahammad, T., Beig, A.R., Al-Hosani, K. (2013), “An Improved Direct Torque Control of Induction Motor with Modified Sliding Mode Control Approach”. *IEEE 2013*
- [6] Aguilar, G.M., Cortez, L. (2012), “Implementation of the Direct Torque Control (DTC) in current model, with current starting limiter”. Faculty of Sciences of the Electronics, BUAP Puebla, Mexico.
- [7] Sun, D. (2010), “Sliding Mode Direct Torque Control for Induction Motor with Robust Stator Flux observer”, *IEEE 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, China.
- [8] Trzynadlowski, M. A. (2001), “Control of Induction Motors”, Academic Press, Nevada.
- [9] Robyns, B., Franscois, B., Degobert, B., Hautier, P. J. (2012), “Vector Control of Induction Machines Desentisitation and Optimisation through Fuzzy Logic”, Springer, France.
- [10] Bose, K. B. (2002), “Modern Power Electronics and AC Drives”, Prentice Hall, Knoxville.
- [11] Ned, M. (2001), “Advanced Electric Drives”, MNPERE, United States of America.
- [12] Cao-Minh, T., Chakraborty, C., Hori, Y. (2009), “Efficiency Maximization of Induction Motor Drives for Electric Vehicles Based on Actual Measurement of Input Power”. Department of Electrical



Engineering, University of Tokyo,  
Japan.

- [13] Wong, C. C., Chang, Y. S. (1998),  
“Parameter Selection in the Sliding  
Mode Control Design Using Genetic  
Algorithms”. Department of  
Electrical Engineering, Tamkang  
University, Taiwan.
- [14] Hermawanto, D. (2007), “Algoritma  
Genetika dan Contoh Aplikasinya”.  
*Komunitas eLearning*  
*IlmuKomputer.com*
- [15] Goldberg, D. E. (1989), “Genetic  
Algorithms in Search, Optimization  
and Machine Learning”. Addison-  
Wesley.